

2. レーザー生成プラズマ計測の第一歩

2. Introduction to Measurements of Laser-Produced Plasmas

重森啓介 SHIGEMORI Keisuke 大阪大学レーザーエネルギー学研究センター (原稿受付:2015年10月8日)

高強度レーザーを物質に照射することにより,極めて高い温度・圧力のプラズマを得ることができます.このような状態のプラズマは,照射するパルスレーザー光の時間スケールほどの非常に短い時間内での現象です. この短時間で刻一刻と変化する微小なレーザー生成プラズマは,その性質に則った計測を行う必要があります. この章では,このレーザー生成プラズマの特徴を計測という観点から要点をまとめ,高強度レーザーで生成する 高エネルギー密度プラズマの特徴,そしてその計測の概要を示し,この章に続くいろいろな高エネルギー密度プ ラズマ計測への導入を行います.

Keywords:

high energy density plasmas, resolution, high-intensity laser, ultrafast phenomena

2.1 はじめに

本講座では、高強度レーザーやパルスパワー装置を用い て得られる高エネルギー密度プラズマ計測に関して、次章 よりその具体例を通して記述を行います.その前の導入と して、この章では全体を通して共通性の高い事項である高 強度レーザー生成プラズマ計測の基礎から紹介を始めま す.ここで述べるレーザー生成プラズマの計測自体につい ては、その概念・考え方や基本的な手引きがその他一般的 な実験の計測と全く違うというわけではありません.ただ し、高強度レーザーで得られる高エネルギー密度プラズマ は、計測対象として様々な特徴があり、それを念頭に置い て考える必要があります.高強度レーザーやパルスパワー 装置による高エネルギー密度プラズマ計測は続く章で具体 的に述べられますが、まずはこの高エネルギー密度プラズ マに初めて触れる方を想定し、実験を行う前段階としての 「準備運動」から始めてみることにします.

2.2 レーザー生成プラズマの特徴

ここではレーザー生成プラズマについて、計測という観 点でその特徴を見ていきましょう.レーザーポインターの ような比較的弱いレーザーを物質に当てると、その光は反 射・散乱をうけ、透明な物質であれば透過します.しかし ながら、強度がどんどん上がっていくと、物質表面から電 離、すなわちプラズマ化が起こり、そのレーザー光の波長 で決定される電子密度の点で強い吸収が起こります.吸収 されたレーザーのエネルギーは、電子熱伝導などを介して ターゲット方向と外方向に輸送されます.ターゲット内部 には強い圧力が衝撃波によって伝播し、外方向にはアブ レーションとして質量が噴出します.これらがバランスして定常状態になります.

図1に、ごく一般的なナノ秒レーザーを固体ターゲット に照射した場合の、ターゲット深さ方向の密度・温度の空 間分布の一例を示します.初期の固体ターゲットは常温で あり(左側)、そこに高温で比較的低密度なプラズマ(右 側)ができることから、高温で低密度のプラズマが低温で 高密度な部分を「押す」かたちとなります.

ここで重要なのは、縦軸と横軸のスケールです.まず温 度だけを見てみると、レーザー照射前のターゲットの温度 は室温ですが、レーザー照射によって得られるプラズマの 温度は1keV (1000万度)を超える高温状態となります.密 度に関しては、ターゲット内部は固体密度であり、アブ レーション方向に指数関数的に密度が下がり、後述の通り 真空の状態に囲まれています.このように温度・密度の値 は10桁以上も隔たりがあることになりますが、横軸の空間 スケールはおおよそ1mm以下という非常に狭い領域で す.すなわち、この極端な状態の変化がごく小さな領域に 凝縮していることになります.さらに、この状態はレー ザーのパルス幅(~10⁻⁹ s)以下のスケールで刻一刻と変 化します.

このような特徴を全く考慮に入れずに何の工夫もなく計 測してしまえば、このレーザー生成プラズマは単に「強く 光っている小さな物体」としか判断できません.図1はあ くまで典型的な例であって、実験の条件によってはこのよ うな理想的な形状のプラズマでない場合もあり、未知の状 態であることもしばしばです.すなわち、レーザーの照射 条件やターゲットの種類、形状などで無限のパターンを創

Institute of Laser Engineering, Osaka University, Suita, OSAKA 565-0871, Japan

author's e-mail: shige@ile.osaka-u.ac.jp



図1 典型的なレーザー生成プラズマの温度・密度構造.

り出し,これを正確に計測するのがレーザー生成プラズマ の実験ということになります.このバラエティに富んだ条 件下での微小な速い変化を追うことが,レーザー生成プラ ズマ計測にあたって困難な点であると同時にチャレンジン グな研究テーマと言えましょう.

2.3 レーザー生成プラズマをどう測るか?

このような小さくて速く変化するレーザー生成プラズマ がどういう物理量を持つのか、という答えを実験的に得る ためには、その小さい・速いという特徴から紐解くことが 必要になります.まず「小さい」というところに対応する のはプラズマの微小な空間方向の分布を得ることです.す なわち、ある物理量を空間の関数として得ること、言い換 えると空間方向に情報を「分解」して計測することになり ます.プラズマのサイズが小さいことと同じように、その 時間変化が速いことも考慮すると、時間方向にも情報を分 解して計測しなければならないことになります.

これらレーザープラズマの基本的な特徴を得たうえで、 もう少し情報量が欲しくなるかもしれません.プラズマか らの発光の波長の分布を求めたいのであれば、波長方向に 情報を分解する必要があります.また、発生する電子など のエネルギーの分布を得たいのであれば、同じようにこれ らを分解して計測することになります.図2にレーザー生 成プラズマ計測の概念図を示します.空間分解を行う場 合、それはすなわち像(Image)を得ることになります.こ のためには、例えば可視光であればレンズなどの光学系が 用いられます.時間分解については様々な手法があります が、プラズマからの電流を電気信号としてオシロスコープ で測るようなものが挙げられます.波長分解については、 プリズムなどの分光器を用いることが考えられます.こう いった連続したある物理量を「定量的」に得ることは、計 測全般として重要な課題となります.

もう一つここでポイントになるのは、上記のうちの一つ のみの分解(計測)を行っても、多くの場合はそのレー ザー生成プラズマの情報量として十分でないことです。例 えば、プラズマの発光の綺麗な像(2次元像)をレンズな どによって得たとしても、時間分解ができていなければ レーザー照射中のプラズマの変化はわかりません。すなわ ち「時間積分」の像となり、レーザー照射の最初から最後



図2 得たい情報によって物理パラメータを「分解」して計測す るいくつかの例.上より時間分解、波長(スペクトル)分 解,空間分解.

までの積算した値となるため、いくら素晴らしい空間分解 計測を行ったとしても、時間変化が激しい条件であれば無 意味なデータとなります.これを解決するために、空間分 解と時間分解の両方の機能をもった計測法・計測器を適用 したり、複数の計測器を同時に使用することによって情報 を多面的に取得するアプローチが取られます.

なお,ここで空間分解や時間分解などの性能を示す指標 は「分解能」と定義されます.測りたいプラズマの時間・ 空間変化のスケールなどと比べて,この分解能が十分に小 さいことが必要条件となります.そうでなければ,分解能 の悪い「ぼやけた」結果になります.レーザー生成プラズ マは小さくて速い変化を示すがゆえに,適正な分解能を もった計測系を使用することが必須であり,さらにこの分 解能を上げることが計測という観点では最も重要な研究課 題の一つになります.

2.4 レーザー生成プラズマの実験環境

次に上記のようなレーザー生成プラズマの実験環境を見 てみましょう.ここではごく典型的な例:高強度レーザー を集光レンズで固体ターゲットに照射し,プラズマを生成 する実験を想定します.実験に関してまず留意しなければ ならないことは,ターゲットは真空中でレーザーに照射さ れることです.高エネルギー密度状態のプラズマを生成す るような高強度レーザーはすなわち強い電場をもつ電磁波 であるので,大気中で集光するとブレークダウン(絶縁破 壊)を引き起こし,ターゲット上に集光するまでにエネル ギーを失ってしまいます[1].このため,実験には真空容 器がハードウェアとして必要となります.この真空条件下 での実験環境というのが,計測技術のポイントになりま す.

図3に大阪大学レーザーエネルギー学研究センターの激 光 XII 号の照射用真空容器の写真を示します.真空容器に 関しては,計測だけでなくレーザー光の集光に関しても考 慮に入れないといけないため,その大きさや形は装置に



図3 大阪大学レーザーエネルギー学研究センターの激光 XII 号 のターゲット照射用真空容器(ターゲット室 I).

よって様々です.この写真の真空容器の場合,激光 XII 号 の12本のビーム(直径 30 cm)が正12面体に照射される配 位になっているため真空容器は球状となり,焦点距離や入 射レーザーのビームサイズでその大きさがほぼ決まってき ます.この真空容器の中心にレーザー光が集光し,プラズ マが生成します.真空容器の大きさは直径約2m弱ですの で,写真にある計測器用のフランジに計測器を装着し,約 1m先のプラズマを観測することになります.この真空容 器はかなり大きいように感じますが,米国ローレンスリバ モア研の NIF(国立点火施設)の真空容器は直径が10m という更に巨大なものです[2].

この真空中で得られる高エネルギー密度プラズマは、前 述の通り「微小な」ものであるため、空間分解計測(像計 測)を行う際は、この環境下で像を拡大することを念頭に 置くことが必要になります. ここではまず, 可視光を計測 することを考えてみます.像を拡大するやり方として,顕 微鏡と望遠鏡の2つがあります. 顕微鏡は近くの微小なも のを拡大する、望遠鏡は遠くの大きなものを拡大するとい う役目がありますが、レーザー生成プラズマの計測の場合 はどうでしょうか? 計測となる対象物は夜空の星ほど遠 くにあるわけではありませんので、レーザー生成プラズマ の直近に顕微鏡のようにレンズを置きたいところですが, 生成するプラズマやデブリ(破片)の影響があるため、あ まり近くに置くとダメージが入ってしまいます. ターゲッ トとの安全な距離は装置に依存するところがありますが、 焦点距離の短い顕微鏡用の対物レンズを置くのは一般的に 難しい距離です.よって、ある安全な距離をおいて最初の 結像レンズを置くことになります。このレンズで結像され た像をさらに別のレンズ等で計測器(検出器)まで転送す るのが一般的です.

上記は光学計測の場合ですが、X線などの場合も同様 で、結像系をどこにどのように配置するのかがポイントに なります.X線の場合、その扱いやすさと構造の簡便さか ら、ピンホールがよく使用されます.また、画像計測(空 間分解計測)のほかに、波長分解(スペクトル分解)を行 う場合もあります. この際はレンズやピンホールの代わり に,分光器(結晶,回折格子,プリズムなど)を用いるこ とになります. レーザー生成プラズマにおいては,可視光 やX線などの電磁波以外にも荷電粒子や電子,中性子など も計測対象になります. その場合も,「像」として計測を 行うのであれば考え方は同じです.

これら必要な光学系の一部(または全部)は真空容器中 に配置されます.正確な光軸調整(アライメント)を行う ために,固定だけでなく調整のための駆動機構を備える必 要があります.これらの調整は真空中で行う必要な場合も あれば,大気中で調整を行った後に真空引きを行う場合も あります.これらの手順も考慮の上,実際に必要な機器を 設計・設定することが重要です.

2.5 レーザー生成プラズマの計測法と計測器

レーザー生成プラズマは,密度・温度の高い領域では可 視光や X 線などの発光量(放出量)が充分に多いため,そ れらを直接計測することによって必要な物理量を得ること ができます.レーザー生成プラズマより放出されるのは, 可視光や X 線などの電磁波のほか,電子やイオン,中性子 などの粒子もあり得ます.これらの直接計測のみで得られ る物理パラメータとしては,プラズマの温度・スペクトル などが代表例として挙げられます.このような計測法は自 発光計測,また後に説明する計測法との対比で受動的計測 と呼ばれることがあります.

一方で直接観測が難しい状態,すなわち比較的低温また は低密度状態のレーザー生成プラズマを計測しようとする 場合,そのプラズマ自身からの直接計測では,充分な信号 量が得られない場合があります.このような場合に威力を 発揮するのが能動的計測です.図4に典型的な配置図を示 します.計測対象のプラズマとは別に光源を導入し,その 光源とプラズマを相互作用させることによりプラズマの物 理量を計測するものです.

この手法は、レーザーでプラズマを生成(ポンプ)し、別 の光源で測る(プローブ)ということで「ポンプ・プロー ブ法」と呼ばれます.計測対象となるプラズマのパラメー タや物理量の種類によって、プローブの種類は様々です. プローブ源としては、レーザーのような可視光のほかにも X線や粒子線などが用いられ、その相互作用に関しても反 射や散乱、吸収などが挙げられます.このポンプ・プロー ブ計測は、前述のプラズマからの放出物を利用した計測と の対比から、能動的計測と呼ばれることがあります.得た いプラズマのパラメータによって組み合わせ方が非常に多 く、この選択や利用する相互作用をうまく考えるところが 計測の難しいところであり、逆に新しいアイデアを大いに 発揮できる部分でもあります.

図4のポンプ・プローブ計測の例では、プラスチック薄 膜ターゲットにレーザー光を照射して加速させ、その軌跡 を観測する配置を示しています.この実験の場合、観測し たいターゲットの横に金属ターゲットを配置し、両方の ターゲットに同時にレーザー光を照射することにより、金 属ターゲットから発生するレーザープラズマX線を「プ



図4 ポンプ・プローブ計測の一例.プローブ光をX線として ターゲット平板を加速させた場合の影絵像をX線ストリー クカメラで計測したときのデータ例(空間1次元,時間分 解計測).

ローブ」として使用します(図では詳しく書いていません が、ちょうどプローブ光の上流側に金属ターゲットが置か れていると想像してください).ここではX線をプローブ 光としていて、そのプローブ光X線をプラスチック薄膜が 吸収するという相互作用を利用しています.すなわち透過 率の高い=密度の薄いプラズマはX線強度が高く、逆に透 過率の低い=密度の濃いプラズマは強度が低くなるため、 ちょうど「影絵」を観測していることになり、その影絵の 位置からターゲットの位置を得ようとするものです.

ここではレーザー照射によって加速する状態、すなわち ターゲット位置の時間変化を得ようとすることが目的であ り、そのまま透過X線像をX線フィルムなどで計測してし まうと時間積分像になってしまうため、まったく意味をな しません. 前述の通り, 観測するプラズマは非常に短い時 間スケールで変化するため、その変化を追うためには時間 分解計測が必須です。よって、計測器(検出器)自体に時 間分解機構を持たせる必要があります. 観測対象となるプ ラズマの時間変化を考慮し、充分な時間分解能を持たせる ことが重要です.時間分解機構に関しては、その手法も 様々です.図4の場合、影絵となる一部分(点線の部分)を X線ストリークカメラによって計測します. レーザープラ ズマのような速い現象の場合はストリークカメラを用いた 計測が有効です(ストリークカメラに関しては参考文献 [3]に詳しい). プラスチックターゲットを透過する方向に X線ストリークカメラを配置し、この透過強度信号をス リットやピンホールで拡大してX線ストリークカメラの光 電面に結像します.これに時間掃引をかけることにより、 空間1次元の時間分解計測データが得られることになりま す. すなわち横軸:時間,縦軸:空間(距離)という情報 を得ることが出来ます.

以上はストリークカメラを用いた方式ですが,ストリー クカメラなどを使用せずに時間分解計測を行うことも出来 ます.上述の通り,ポンプ・プローブ計測ではポンプ光に 対するプローブ光のスペックを自由自在に変えることが出 来ます.そこで,ポンプ光で得られるプラズマの時間変化 に比べてプローブ光の時間幅を非常に短くすることによ り、プローブ光の時間幅・タイミングにおける瞬間的な状 態(スナップショット)を得ることが出来ます.この場 合、1回の実験で1つのタイミングでしかデータが取れな いという難点はあるものの、高価な時間分解計測器が不要 であることから、繰り返し頻度の高い装置での実験では有 効な手段になります.近年ではフェムト秒クラスの超短パ ルスのプローブ光源が使用できる環境にあるため、時間分 解計測器を用いるよりも高い時間分解能を得ることができ ることから、ポンプ・プローブ計測の新たな主流になりつ つあります.

2.6 データの取得と解析

以上のような実験・計測を行い,実際に「データ」とし て結果を取得しなければなりません.すなわち記録装置が 必要となります.ひと昔前は写真(画像)をフィルムで記 録していましたが,いまやデジタルカメラやスマートフォ ンで写真を撮影する場合には,CCDなどの記録デバイスを 用いることが一般的です.これは実験現場でも同様で,電 子的な記録デバイスが主流となっているため,データはデ ジタルデータとして保存されます.電子デバイス以外で 「生き残っている」貴重な例としては,イメージング・プ レート[4]やCR-39などの固体飛跡検出器[5]が挙げられ ます.これらも読み取り装置を介して最終的にはデジタル データとして保存され,数値データとして解析されること になります.

ここまで書くと、データ取得はとても簡単で、解析もパ ソコン上でササッと出来てしまうように錯覚してしまいま すが、このデータ取得から解析は実験全体の「締め」のと ころであり、ここが研究そのものの価値を決定するところ です.解析自体はここで述べる内容ではありませんが、ポ イントとしては実験で得られるデータを見ながら「解析に 値するデータかどうか?」を常に考えながら計測を行うこ とが必要になります.解析に値しないデータであれば、修 正を加えて計測をやり直すという流れが作れば、実験の成 功率が増すことになります.

もう一つ最後に付け加えなければいけないことは、デー タの取得とともに、実験条件などの記録をきちんと付けて おくことです.いわゆる実験ノートを作成することであ り、「手で書く」紙ベースのものにしておくと、いつでも 手元に取って記録が書ける・見られる媒体を持てることに なります.以上のいくつかの点は、一般的な実験でも当て はまる内容です.

2.7 まとめ

この章では、レーザー生成プラズマの計測に関して、 レーザー生成プラズマ特有の性質や計測上の考え方、ハー ドウェアに関する概説を行いました.計測対象となるプラ ズマの大まかな性質や計測上のポイントを述べました.最 初にも記した通り、計測の基本的な考え方としては他の実 験と大きく変わることはありませんが、レーザー生成プラ ズマの場合は(何度も記しているように)小さくて速い現 象なので,我々の肉眼や行動の時間スケールとかけ離れた 領域にあることから,「実験」を行っても「実感」できない ところが少し苦しいところです(筆者自身,レーザー生成 プラズマのリアルタイムの変化を肉眼で見たことがありま せん).次の章からは,具体的な実験の例を通して高エネ ルギー密度プラズマの実像に迫り,より「実感」に近い状 況を考えてみましょう.

参考文献

- [1]山中龍彦:プラズマ・核融合学会誌 69,656 (1993).
- [2] https://lasers.llnl.gov/about/how-nif-works/beamline/ target-chamber
- [3] http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/sys/ SHSS0006J_STREAK.pdf
- [4] http://fujifilm.jp/business/healthcare/digital_xray_imaging/fcr/imaging_plate/
- [5] 金崎真聡 他:プラズマ・核融合学会誌 88,261 (2012).

